

Renewable Gasfield – eine P2G-Demoanlage

Katrin Salbrechter¹, Markus Lehner¹, Klaus Neumann²

¹ Montanuniversität Leoben, Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben, 03842/402-5023,
katrin.salbrechter@unileoben.ac.at, vtiu-unileoben.ac.at

² Energie Steiermark Technik GmbH, www.e-steiermark.com

Kurzfassung:

Das Projekt **Renewable Gasfield (RGF)** umfasst eine ganzheitliche Strategie der regionalen Nutzung und langfristigeren Speicherung von erneuerbaren, grünem Überschussstrom aus fluktuierenden Energiequellen. Dieser soll in synthetische Energieträger wie Wasserstoff oder Methan umgewandelt werden, sodass eine bedarfsabhängige, lokale Nutzung und Einspeisung ins Netz gewährleistet werden kann. Diese sogenannte Power-to-Gas-Technologie wird im Rahmen der „Vorzeigeregion Energie“ der Wasserstoffinitiative Vorzeigeregion Austria Power & Gas (Wiva P&G) in der Gemeinde Gabersdorf in der Südsteiermark realisiert.

Eine neu errichtete Photovoltaikanlage speist eine Elektrolyse mit erneuerbarem Strom, in der grüner Wasserstoff produziert wird. Die Elektrolyse koppelt an eine innovative, lastflexible katalytische Methanisierungsanlage, in der CO₂ aus der benachbarten Biogasanlage mit Wasserstoff in-situ, also ohne vorherige Abtrennung aus dem Biogas, zu synthetisch hergestelltem, grünem Methan umgesetzt werden soll. Als Outputströme des Konzeptes Renewable Gasfield fallen sowohl Wasserstoff, verwendbar für Sektoren wie Industrie oder Mobilität, als auch Methan für die direkte Einspeisung laut ÖVGW G 31 ins Erdgasnetz an.

Für die Auslegung der lastflexiblen Methanisierungsanlage in Gabersdorf werden unterschiedlichste Betriebsparameter in einer Pilotanlage an der Montanuniversität Leoben untersucht und evaluiert. Die generierten Forschungsergebnisse dienen als Grundlage für die erfolgreiche Umsetzung und Inbetriebnahme der Demonstrationsanlage im Projekt Renewable Gasfield.

Keywords: Elektrolyse, Wasserstoff, Methanisierung, SNG, Power-to-X, Sektorkopplung

1 Einleitung

Die #mission2030 plant in den kommenden Jahren einen starken Ausbau von erneuerbaren Energien, was neben der Reduktion von Treibhausgasemissionen ein zentrales Ziel der aktiven Klima- und Energiestrategie der österreichischen Bundesregierung darstellt. Der Umschwung von kohlenstoffhaltigen zu erneuerbaren Energiequellen soll den Klimawandel und negative Auswirkungen auf die Lebensqualität aller Lebewesen verringern. Die Dekarbonisierung der Energieversorgung soll besonders durch den Ausbau von Wind- und Photovoltaikanlagen gesteuert werden. [1] Durch den fluktuierenden Charakter erneuerbarer Energien müssen Möglichkeiten zur Langzeitspeicherung der grünen, gewonnenen Energie geschaffen werden um die Versorgungssicherheit zu garantieren. [2] Das österreichische Gasnetz bietet einerseits ein enormes Speicherpotential und ermöglicht andererseits einen

Transport größerer Energiemengen. Als Speichermedien erneuerbarer Energie eignen sich hierfür Wasserstoff (H_2) und synthetisch hergestelltes Methan (engl. synthetic natural gas – SNG). Grüne Energie aus Wind- und Photovoltaikanlagen erzeugt in einer Elektrolyse Wasserstoff, der entweder gespeichert, verteilt oder mit kohlenstoffhaltigen (Ab-)Gasen zu Methan umgesetzt werden kann. [3] Diese sogenannten Power-to-Gas Technologien bieten in der Zukunft eine Chance ein flexibles und stark vernetztes Energiesystem zu generieren, welches auf regionale Gegebenheiten und Bedürfnisse abgestimmt ist.

2 RGF – eine Demoanlage

Das Demonstrationsprojekt **Renewable Gasfield (RGF)** ist ein Teil der Energie-Vorzeigeregion der Wasserstoffinitiative Vorzeigeregion Austria Power & Gas (kurz WIVA P&G), welche das Ziel verfolgt ein stark wasserstoffbasiertes Energiesystem in Österreich aufzubauen. Dabei ermöglichen Synergien und Sektorkopplungen für Strom, Gas und Wärme eine effiziente Energieverteilung in Abhängigkeit der regionalen Gegebenheiten von Industrie und Haushalten. In Abbildung 1 ist ein solch transformiertes Energiesystem dargestellt. Eine sogenannte Smart City wird mit der Energie von erneuerbaren Quellen gespeist, das Gas- und Energienetz versorgt die angesiedelten Firmen und Wohnhäuser mit grüner Energie und Technologien wie eine Methanisierungsanlage (unter der Nummer 14 in Abbildung 1 ersichtlich) sind in der Vorzeigeregion integriert. Die zentrale Komponente der Energieversorgung bildet erneuerbarer Wasserstoff, dessen Anwendungsfelder in Abhängigkeit der Herstellung, Speicherung und Verteilung, Umsetzung zu synthetischem Erdgas, Verbrennung und Rückverstromung für verschiedenste Branchen realisiert, analysiert und weiterentwickelt werden. [4]

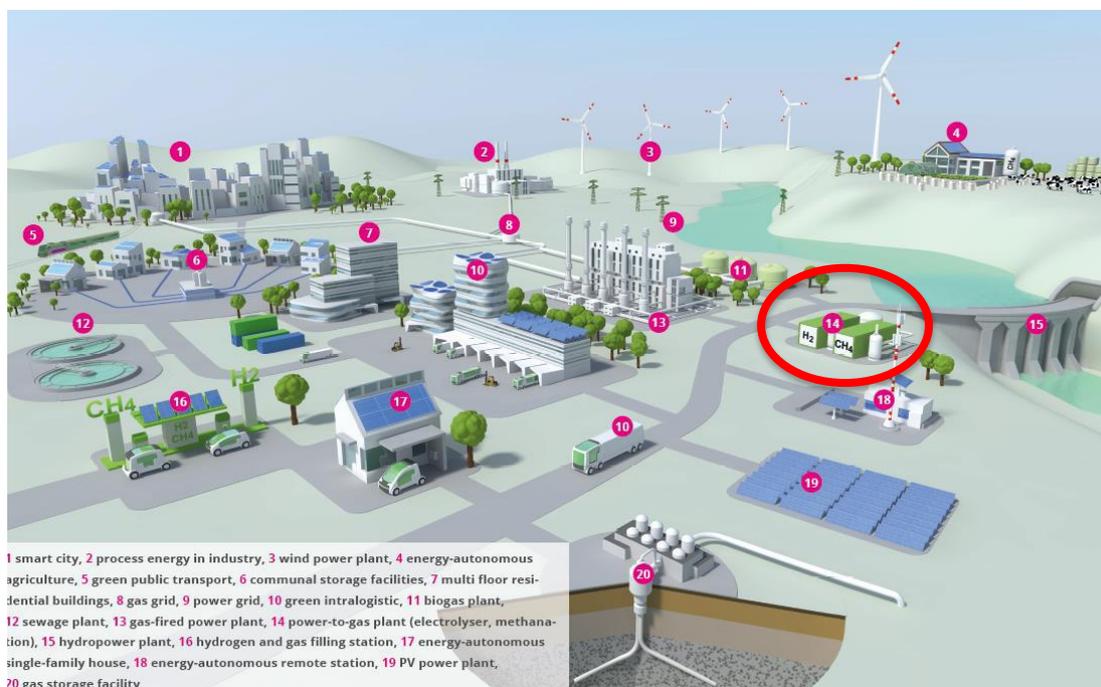


Abbildung 1: Darstellung einer Vorzeigeregion der Wiva P&G [5]

2.1 Konzept der Demoanlage

Im Fokus der Entwicklung steht ein vielseitig einsetzbarer „modularer Anlagenbau“ mit besonderer Berücksichtigung der regionalen Gegebenheiten. Eine Erweiterung oder Anpassung der Anlagenkomponenten soll in Zukunft möglich sein. Es folgt eine genauere Beschreibung des Konzeptes von Renewable Gasfield inkl. aller geplanten Anlagenkomponenten, welche in Abbildung 2 zu sehen ist.

Am Projektstandort in Gabersdorf (Südsteiermark) soll Strom aus einer lokalen, neu errichteten PV Anlage zur Herstellung von grünem Wasserstoff in einer 1 MW_{el} PEM-Elektrolyse verwendet werden. Für die Entkopplung von Wasserstoff- und Stromproduktion wird ein 30 bar Zwischenspeicher nach der Elektrolyse eingerichtet. Ausgehend vom 30 bar Niederdruckspeicher kann der Wasserstoff auf zwei unterschiedliche Arten genutzt werden. Einerseits wird er auf 450 bar verdichtet und in Trailern an Verbraucher in der Industrie, Gewerbe oder Mobilität weitergegeben. Andererseits kann der grüne Wasserstoff einer innovativen, lastflexiblen katalytischen Methanisierungsanlage zugeführt werden. Diese wird mit neuartigen, selbst beschichteten Wabenkatalysatoren bestückt sein. Das im Produktgas der Biogasanlage enthaltene CO₂ wird, ohne vorherige Abtrennung aus dem Biogas, mit Hilfe des grünen Wasserstoffes zu synthetischem Methan umgewandelt und vor Ort ins lokale Gasnetz eingespeist. In Zukunft kann sich auch eine direkte Einspeisung von H₂ mit mehr als den derzeit zulässigen 4 Vol.% durch Änderungen von Richtlinien ergeben. [5]

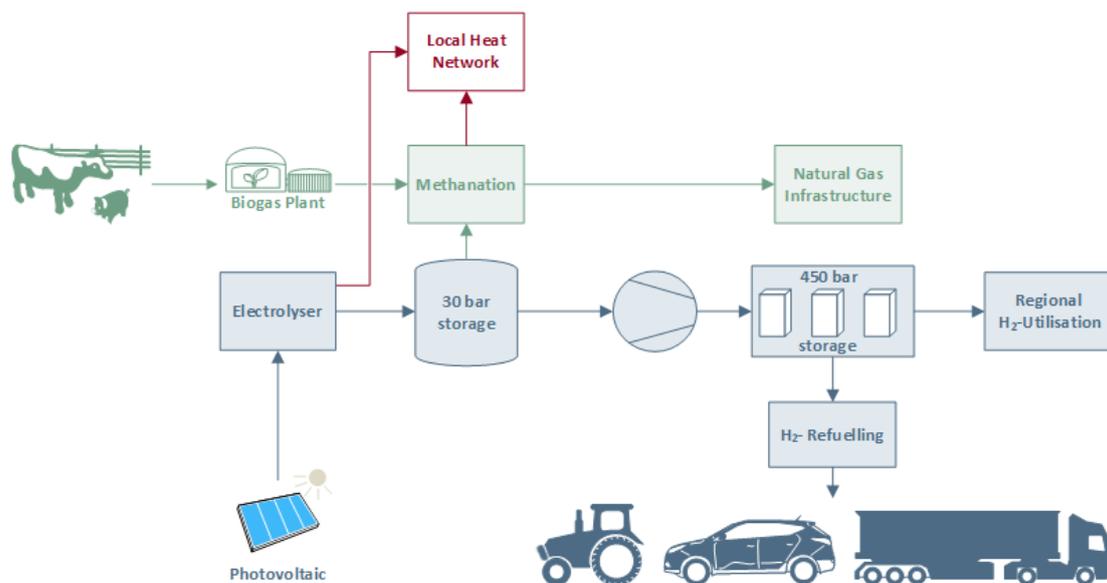


Abbildung 2: Schematisches Anlagenkonzept der Demoanlage in Gabersdorf [5]

2.2 Ziele des Projektes

Das übergeordnete Ziel von Renewable Gasfield beschreibt das Zusammenspiel vom Einsatz unterschiedlicher erneuerbarer Energien und der Bedarfsdeckung regionaler Gegebenheiten in Bezug auf Industrie, Gewerbe und Mobilität.

Darüber hinaus sind folgende spezifische Ziele für die umfassende erneuerbare Infrastruktur gesetzt: [5]

- Der Ausbau von erneuerbaren Energien wird mit der Errichtung der 1,0 MW_p PV-Anlage vorangetrieben.
- Die optimierte Anlageninfrastruktur und Energieverteilung von H₂ und CH₄ ermöglichen kompetitive Preise von Energie aus umweltfreundlicher Erzeugung. Die zu erzielenden Kosten für grünen Wasserstoff sollen sich auf < 7€/kg belaufen.
- SNG kann im existierenden Gasnetz zu Verbrauchern geleitet werden. Dadurch verringert sich der Verbrauch an fossilen Energieträgern für z.B. Heizzwecke.
- Der modulare Anlagenbau kann in ähnlichen Projekten in anderen Regionen weiterverwendet und adaptiert werden.
- Die enge Zusammenarbeit von benachbarten Gemeinden in der Region führt zur Erhöhung der Akzeptanz für neuartige Technologien und stärkt das öffentliche Bewusstsein für die Durchführung der Energiewende.

3 Methanisierungsanlage

3.1 Technische Ziele

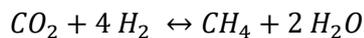
Zur Errichtung der lastflexiblen Methanisierungsanlage mit keramischen Wabenkatalysatoren wurden Ergebnisse und Prozessparameter aus einem Vorprojekt („EE-Methan aus CO₂“) des Lehrstuhles für Verfahrenstechnik an der Montanuniversität Leoben übernommen. In diesem Vorprojekt wurde sowohl der Beschichtungsprozess der keramischen Wabenkatalysatoren als auch der Performancevergleich von Wabenkatalysatoren und kommerziell erhältlichem Schüttkatalysator untersucht. [3, 6] Für die Umsetzung der Demoanlage in Gabersdorf sollen folgende Ziele erreicht werden [5]:

- Errichtung und Inbetriebnahme einer lastflexiblen Methanisierungsanlage inklusive einer Produktgasaufbereitung für die normgerechte Einspeisung von synthetischem Methan ins Gasnetz
- Errichtung einer 2-stufigen Adsorbereinheit zur Aufbereitung des Rohbiogases für den Einsatz in der Methanisierungseinheit
- Entwicklung eines Beschichtungsprozesses für industriell einsetzbare Wabenkatalysatoren mit der Garantie für Langzeitstabilität und –aktivität der Waben
- Herstellung von SNG nach ÖVGW G 31 [7] für zumindest 2.000 Betriebsstunden

3.2 Aufbau

In Abbildung 3 ist das Fließschema der Methanisierungsanlage mit ihren vor- und nachgeschalteten Komponenten zu sehen. Das Biogas aus der Bestandsanlage hat eine Zusammensetzung von etwa 45 Vol.% CO₂ und 55 Vol.% CH₄. Dieses Rohbiogas wird vor der Komprimierung für den Methanisierungsprozess in einem 2-stufigem Adsorber von Katalysatorgiften (H₂S, NH₃) befreit. Der aus der Elektrolyse stammende Wasserstoff liegt bereits auf einem Druckniveau von ca. 30 bar vor. Beide Inputströme, Wasserstoff und vorgereinigtes Biogas, strömen in die 2-stufige mit keramischen Wabenkatalysatoren bestückte Methanisierungsanlage. Hinter beiden Reaktoren ist auf Grund der exothermen Methanisierungsreaktion (siehe Formel 1) ein luftgekühlter Wärmetauscher zwischengeschaltet. Vor der Einbringung des synthetisch hergestellten Methans wird der

Produktstrom aus der Methanisierungsanlage mittels Polymermembran aufbereitet. Hierbei wird sichergestellt, dass der ins Erdgasnetz eingeleitete Gasstrom eine Zusammensetzung von > 96 Vol.% CH₄ beinhaltet und die Einhaltung der ÖVGW G31 sichergestellt wird. Diese österreichische Richtlinie beschreibt die Qualitätsanforderungen des Gases im Erdgasnetz. Das zurückgehaltene Retentat der Polymeraufbereitung wird über eine Kreislaufführung erneut in die Methanisierungsreaktoren eingebracht.



$$\Delta H^R = -164 \text{ kJ/mol}$$

(Formel 1 [8])

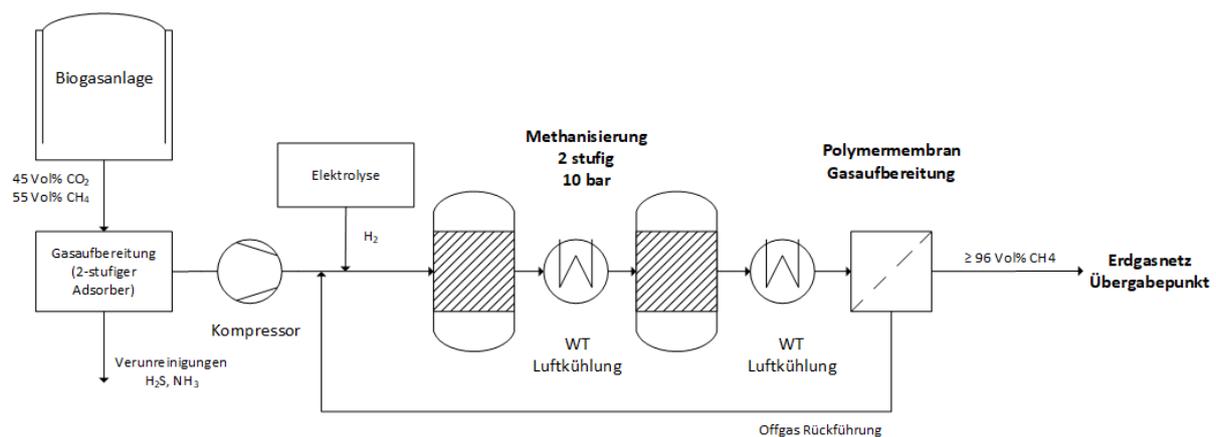


Abbildung 3: Geplantes Fließschemata der Methanisierungsanlage

3.3 Geplanter Reaktoraufbau für Methanisierungseinheit

Die am Lehrstuhl für Verfahrenstechnik (VTiU) eigens hergestellten Wabenkatalysatoren werden mit aktivem Nickel beschichtet um die Umsetzung von CO₂ zu Methan zu ermöglichen. Details zum Beschichtungsprozess werden in Kapitel 4.2 erläutert.

Für die Garantie der Langzeitstabilität und Langzeitaktivität der Wabenkatalysatoren wird in den kommenden Monaten ein reproduzierbarer Beschichtungsprozess ausgearbeitet. Die zu verbauenden Waben haben eine Größe von 100x100x150 mm³. In Abbildung 4 ist im schematischen Reaktorquerschnitt zu sehen, wie die einzelnen Kompartimente (*engl. Chambers*) des Reaktors mit einer gewissen und noch exakt zu bestimmenden Wabenanzahl (*honeycomb - engl. = Wabe*) bestückt werden. Der geteilte Aufbau des Reaktors resultiert aus der geplanten lastflexiblen Betriebsweise der Methanisierungsreaktoren. Die Wabenkatalysatoren weisen auf Grund ihrer keramischen Grundstruktur eine gute Wärmespeicherfähigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit auf, sodass ein flexibles Stand-by Verhalten erreicht wird. Je nach Lastfall werden alle – bei Vollastbetrieb - oder einzelne Kammern – bei geringerer Last – betrieben, wobei zwischen den Kammern zyklisch geschaltet werden kann. [9]

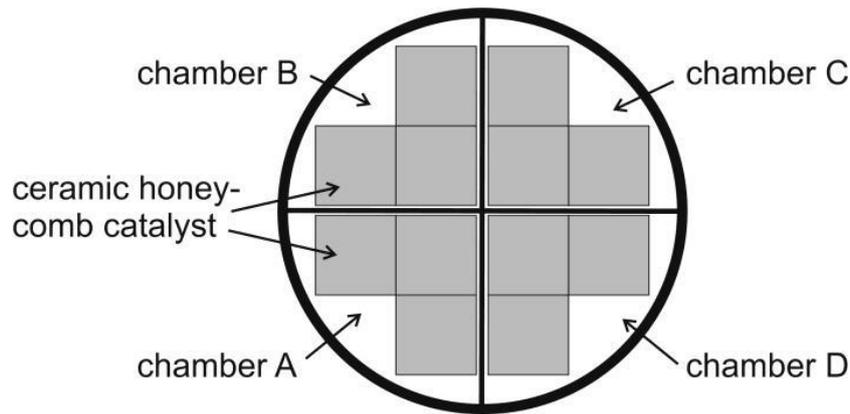


Abbildung 4: Reaktorquerschnitt der Methanisierungsanlage in Gabersdorf

4 Experimentelle Untersuchungen

Als Vorbereitung für eine erfolgreiche Implementierung der Wabenkatalysatoren im größeren Maßstab werden am VTiU vergleichbare Versuche in Anlehnung an die zukünftigen Prozessparameter in Gabersdorf durchgeführt. In den anschließenden Kapiteln folgen Daten zur Technikums- bzw. Versuchsanlage am Lehrstuhl für Verfahrenstechnik an der Montanuniversität Leoben, Details zum Beschichtungsprozess der Wabenkörper und erste Ergebnisse aus Testreihen.

4.1 Laborversuche zur katalytischen Methanisierung

Die Technikumsanlage zur Untersuchung der Performance der Wabenkatalysatoren und deren optimalen Betriebsbedingungen besteht aus drei Festbettreaktoren, welche einzeln oder in Serie betrieben werden können (Abbildung 5). Der maximale Durchfluss beträgt 50 NI/min, das Druckniveau kann zwischen 1-20 bar variiert werden, jeder Reaktor ist mit elektrischen Begleitheizungen für Anfahrprozesse ausgestattet und die maximale Betriebstemperatur der Reaktoren beträgt aus materialtechnischen Gründen 700 °C. Als Inputgase können beliebige Mischungen aus synthetischen Gasen hergestellt werden. Nach der chemischen Katalyse in den einzelnen Reaktoren durchläuft der Produktgasstrom ein Infrarot-Photometer der Firma ABB für die Bestimmung der Gaszusammensetzung.



**Abbildung 5: Methanisierungsanlage im Technikum des Lehrstuhles für
Verfahrenstechnik an der Montanuniversität Leoben**

Die einzelnen Reaktoren können sowohl mit kommerziellem Schüttkatalysator (z.B. Meth®134) als auch mit Wabenkatalysatoren bestückt werden. Die Abbildung 6 zeigt den Reaktorquerschnitt eines Festbettreaktors im Technikum des VTiUs. Das Gas durchströmt den Reaktor von unten nach oben und passiert zu Beginn eine Schüttung aus keramischen Inertkugeln, um eine gleichmäßige Verteilung des Gasflusses durch den Katalysator zu gewährleisten. Dieser befindet sich oberhalb der Inertschüttung. Für die Füllung des Abstandes zwischen Wabe und Reaktorwand ist die Wabe mit Isolationswolle umwickelt. Außerdem sind für die Untersuchung der Temperaturentwicklung auf Grund der chemischen Reaktion Thermoelemente in der Wabe und am Gasaustrittsort angebracht.

Das in Abbildung 6 gezeigte Reaktorsetup kann zudem auch mit kommerziellem Schüttkatalysator befüllt werden. Dabei wird oberhalb der Inertschüttung eine Katalysatorschüttung aufgebracht. Über der Katalysatorschüttung befindet sich zusätzlich noch eine Schüttung aus Inertkugeln.

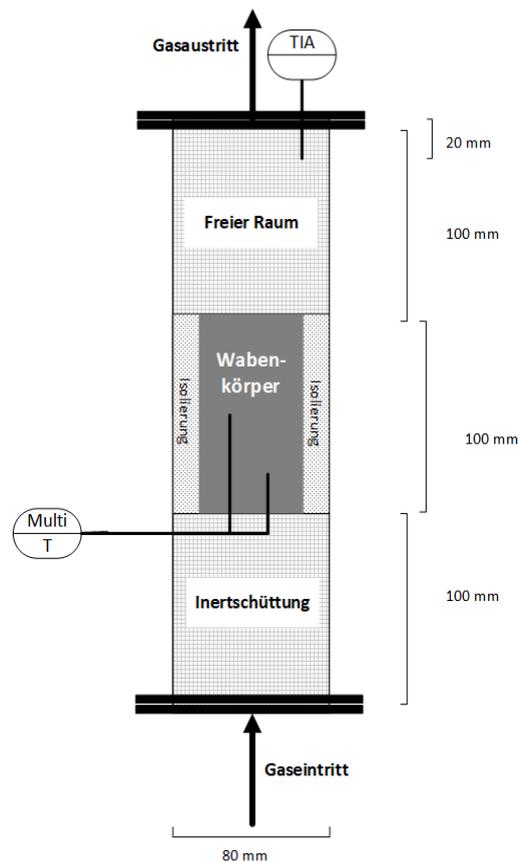


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Reaktorsetups

Gep plante Testreihen zur Sicherstellung eines später kontinuierlichen und erfolgreichen Betriebes der Methanisierungsanlage in Gabersdorf werden sowohl mit Wabekatalysatoren als auch kommerziellen Schüttkatalysator in der Technikumsanlage durchgeführt und evaluiert. Die Performance der Wabekatalysatoren soll der Performance des Schüttkatalysators entsprechen. Die Einhaltung der ÖVGW G31 mit den Qualitätsanforderungen des einzuspeisenden Erdgases muss beim Betrieb der Anlage in Gabersdorf jederzeit erfüllt sein.

4.2 Beschichtung keramischer Waben

Die keramischen Wabekörper, welche in der Technikumsanlage des VTiUs getestet werden, bestehen aus Cordierit ($Mg_2Al_3[AlSi_5O_{18}]$, siehe Rohwabe in Abbildung 7). Im Vergleich zu anderen Grundstrukturmaterialien weisen Waben ein größeres Porenvolumen aber eine geringere spezifische Oberfläche auf (ca. $0,3 \text{ m}^2/\text{g}$). Um diese auf eine benötigte Oberfläche von ca. $100 \text{ m}^2/\text{g}$ zu erhöhen, werden die Waben im 1. Beschichtungsschritt in einen anorganischen Binder (hier Böhmit) getaucht. Erst im 2. Schritt wird das katalytisch aktive Nickel aufgebracht (siehe grünlich verfärbte Wabe in Abbildung 7). Eine Kalzinierung der Waben bei $600 \text{ }^\circ\text{C}$ oder $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ wird sowohl vor dem Auftragen der Beschichtungen als auch nach jedem einzelnen Beschichtungsschritt durchgeführt. Für Versuchsreihen am Lehrstuhl verwendete Waben messen $50 \times 50 \times 100 \text{ mm}^3$ bei einer Zelldichte von 100 cpsi (channels per square inch).

Um die katalytische Aktivität einer Wabe zu erreichen, werden die wie in Abbildung 6 eingebauten Waben zuerst auf 200 °C erhitzt. Anschließend erfolgt die Reduktion mit Wasserstoff. Bei Abschluss der Versuchsreihen muss eine Pressluftspülung für die Sicherstellung der Inaktivität bzw. Oxidation des aktiven Nickels vorgenommen werden. Das inaktive Nickel liegt in oxidischer Form vor (siehe rechtes Bild in Abbildung 7).

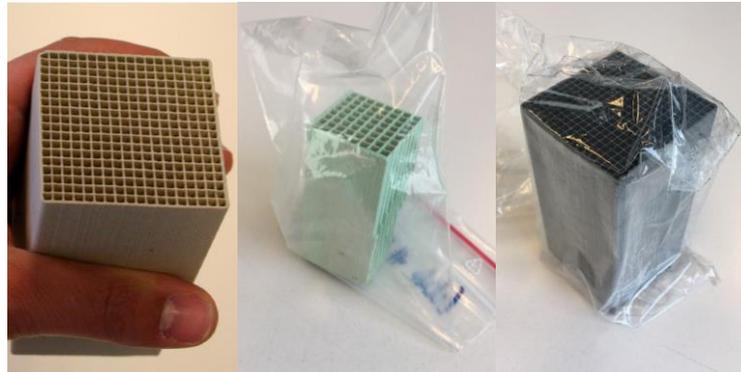


Abbildung 7: Stadien eines Wabenkatalysators (links: roh, mittig: nach 2-stufiger Beschichtung, rechts: gebrauchte Wabe) [10]

4.3 Ergebnisse der Labortests

Bis dato liegen erste Ergebnisse einer Testreihe unter Renewable Gasfield- Bedingungen vor (siehe Abbildung 8). Diese wurden beim Einsatz von kommerziellem Schüttkatalysator generiert.

Dafür wurden zwei Reaktoren der Technikumsanlage in Serie geschaltet und auf einen Betriebsdruck von 10 bar gebracht. Eine GHSV- Variation (gas hour space velocity = $\dot{V}(\text{feed}) / V(\text{Katalysator})$) und eine Wasserstoffüberschuss-Variation wurden angewendet. Die GSHV-Variation bestand aus einem Raumgeschwindigkeitsspektrum von 2.000, 3.000 und 4.000 h^{-1} . Die Wasserstoffzudosierung variiert zwischen einem stöchiometrischem (0% H_2 -Überschuss = 1) und einem überstöchiometrischen Verhältnis (bis zu 10% H_2 -Überschuss = 1,1). Als Inputgas dient synthetisch hergestelltes Biogas aus CO_2 und CH_4 , welches mit Wasserstoff umgesetzt wird.

Im Ergebnisplot in Abbildung 8 sind auf der Abszisse sowohl Druckniveau, Wasserstoffüberschuss, Raumgeschwindigkeit und das Umsatzergebnis von Reaktor 1 und Reaktor 2 aufgetragen. Auf der ersten Ordinate des Diagrammes ist der CO_2 -Umsatz in % und auf der zweiten Ordinate ist die mittlere Reaktortemperatur aufgetragen.

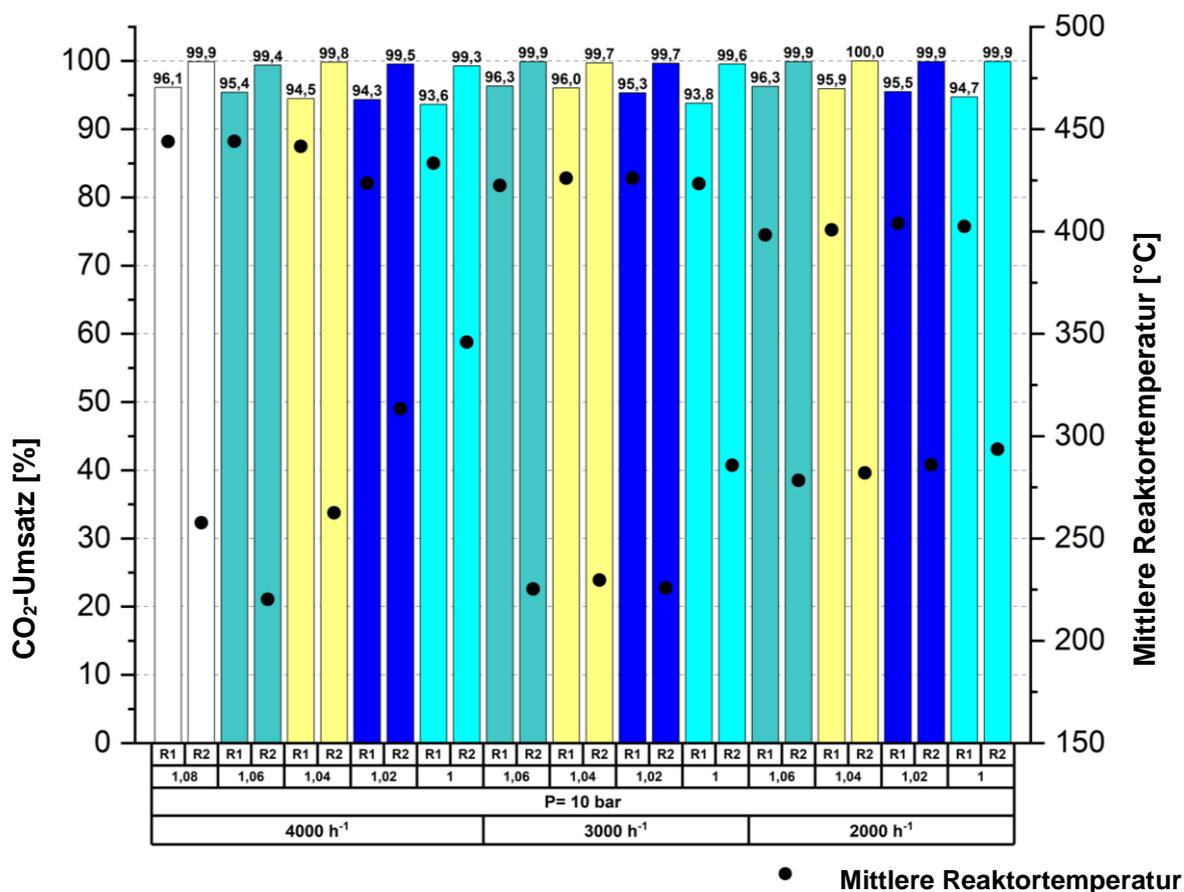


Abbildung 8: Methanisierungsversuche mit Schüttkatalysator

Mit höher werdendem H₂-Überschuss steigt der CO₂ Umsatz, folglich auch die Temperaturen im ersten Reaktor. Die mittlere Reaktortemperatur fällt in der zweiten Reaktorstufe auf Grund der sehr viel geringeren produzierten Methanmenge im Vergleich zum ersten Reaktor. Die Ergebnisse des CO₂-Umsatzes sind nach der 2. Reaktorstufe mit > 99,3% sehr zufriedenstellend und werden in Zukunft mit gleichen Versuchsparemtern mit eigens hergestellten Wabenkatalysatoren wiederholt, denn der kommerzielle Schüttkatalysator dient als Performance-Benchmark der Waben.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zurzeit befindet sich das Projektkonsortium in der Planungsphase und in den Endgesprächen mit der Behörde. In den kommenden Monaten soll die detaillierte Ausführung der Methanisierungsanlage für die Demoanlage in Gabersdorf fixiert werden, sodass mit dem Bau aller Anlageneinheiten begonnen werden kann. Die Inbetriebnahme und der Forschungsbetrieb sollen 2021 gestartet werden.

Parallel dazu werden in der Technikumsanlage weitere Versuchsreihen, sowohl mit Wabenkatalysatoren als auch kommerziellem Schüttkatalysatoren, untersucht. Grundsätzlich zeigen die Methanisierungsversuche von synthetischem Biogas einen CO₂-Umsatz von > 99%. Eine weitere Prüfung der Betriebsparameter wie z.B. des wirtschaftlich tragbaren Wasserstoffüberschusses für die Garantie eines hohen CO₂-Umsatzes soll für den Wabenkatalysator und den Schüttkatalysator durchgeführt werden. In Abhängigkeit der

Performance-Ergebnisse der Waben während der Testläufe an der Technikumsanlage können in Zukunft Adaptierungen im Beschichtungsprozess vorgenommen werden. Nach Beendigung der Testreihen an der Technikumsanlage soll der Forschungsbetrieb nach der Inbetriebnahme in Gabersdorf aufgenommen werden. Schlussendlich soll SNG gemäß ÖVGW G31 ins Netz vor Ort eingespeist werden.

6 Danksagung

Besonderer Dank gilt den Fördergebern. Renewable Gasfield wird im Rahmen der FTI-Initiative „Vorzeigeregion Energie“: Klima und Energiefonds, Kommunalkredit Public Consulting, Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft, WIVA P&G gefördert.

Danke ebenso an alle Projektpartner: Energie Steiermark Technik GmbH (Konsortialführer), Energieagentur Steiermark GmbH, Energienetze Steiermark GmbH, Energieinstitut an der JKU Linz, HyCentA Research GmbH und WIVA P&G - Wasserstoffinitiative Vorzeigeregion Austria Power & Gas.

7 Referenzen

- [1] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie and Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, *#mission2030 - Die österreichische Klima- und Energiestrategie*. [Online] Available: <https://www.bmnt.gv.at/service/publikationen/umwelt/mission-2030-oesterreichische-klima-und-energiestrategie.html>.
- [2] I. Stadler, *Energiespeicher: Bedarf, technologien, integration*. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [3] P. Biegger *et al.*, “Development of Honeycomb Methanation Catalyst and Its Application in Power to Gas Systems,” *Energies*, vol. 11, no. 7, p. 1679, 2018.
- [4] Klima- und Energiefonds, *Energie-Vorzeigeregion WIVA P&G*. [Online] Available: <https://www.vorzeigeregion-energie.at/vorzeigprojekte/renewable-gasfield/>.
- [5] Die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), *Projektbeschreibung Renewable Gasfield: Energie Model Region*.
- [6] F. Kirchbacher, P. Biegger, M. Miltner, M. Lehner, and M. Harasek, “A new methanation and membrane based power-to-gas process for the direct integration of raw biogas – Feasibility and comparison,” *Energy*, vol. 146, pp. 34–46, 2018.
- [7] *Erdgas in Österreich - Gasbeschaffenheit ÖVGW G 31: 2001 05*, 2001.
- [8] J. Kopyscinski, T. J. Schildhauer, and S. M.A. Biollaz, “Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass – A technology review from 1950 to 2009,” *Fuel*, vol. 89, no. 8, pp. 1763–1783, 2010.
- [9] Friedacher Alfred and P. Biegger, “Verfahren und Anlage zur katalytischen Methanisierung von Eduktgasen,” WO 2017/091841 A1.
- [10] 15th Minisymposium Verfahrenstechnik and 6th Partikelforum Conference Proceedings, Ed., *Dynamic Operation of a Power-to-Gas System for Integrated Steelworks*, 2019.